

영광 3,4호기 냉각재 온도 감소운전 적용을 위한 계통분석

System Analysis for Application of Operation at Reduced Temperature in YGN 3,4

이중호, 정해용, 박수기, 정현영

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

증기발생기 전열관에서 발생하는 1차 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)은 원자력발전소 증기발생기의 건전성을 위협하는 중요한 원인의 하나로 이의 진행속도는 냉각재온도에 따라 지수함수 관계로 증가하게 된다. 영광 3,4호기는 In-600 전열관을 사용하고 세계적으로 높은 냉각재온도를 유지하고 있어 냉각재 온도 감소운전(ORT) 적용을 통하여 증기발생기 교체 시기를 지연시키고 발전소 유지보수 비용을 절감하고자 한다. 본 연구에서는 냉각재온도 감소운전 조건을 결정하기 위하여 영광 3,4호기 계통성능을 민감도를 통해 분석하였으며 이를 기반으로 ORT 조건을 제시하였다. 초기운전 조건으로는 설비의 Hardware 변경없이 터빈계통이 원자로 출력을 100% 유지할 수 있는 경제적 범위로서 고온관 온도 612 °F를 제시하였고, 향후 Power Up-rating 가능성과 참조 발전소인 Palo Verde 원전의 ORT 적용사례를 고려하여 여유있는 범위인 고온관 온도 611°F를 ORT 해석조건으로 결정하였다.

Abstract

Primary Water Stress Corrosion Cracking(PWSCC) is one of the main reason threatening the integrity of steam generator(SG). The rate of PWSCC increases logarithmically with the temperature of reactor coolant. In order to delay the replacement of SG and save the O&M cost, it is decided to apply Operation at Reduced Temperature(ORT) in YGN 3,4 which is equipped with In-600 SG tube and is operating with the highest coolant temperature in the world. In this study, the system performance of YGN 3,4 is analyzed by sensitivity analysis to decide the operating condition of ORT. The 612°F of hot-leg coolant temperature which can maintain the 100% of reactor power without the modification of Turbine-Generator(TG) hardware is selected as the economical initial operating condition for ORT. Considering the possibility of power up-rating and the experience of ORT application at Palo Verde plants, the 611°F of hot-leg coolant temperature is decided as the analysis condition for ORT.

I. 서론

증기발생기 전열관에서 발생하는 1차 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)은 원자력발전소 증기발생기의 건전성을 위협하는 중요한 원인의 하나이다. 응력부식균열의 발생 및 진행속도는 일차 냉각재 온도가 높을수록 급격하게 증가하므로 건전성 측면에서는 일차 냉각재의 온도를 낮게 유지하는 것이 유리하다. 그러므로 냉각재온도 감소운전(Operatin at Reduced Temperature, ORT)은 증기발생기 전열관 손상의 주요 원인인 1차 응력부식균열의 발생 및 성장을 억제시킬 수 있는 근본적인 방안 중의 하나이다.

영광 3,4호기의 참조발전소인 Palo Verde에서는 4 EFPY (Effective Full Power Year)를 전후하여 증기발생기 관막음율이 급격히 상승하여 4.62 EFPY 시점인 93년 3월에 2호기에서 SGTR 사고가 발생하였다. 이러한 원인 중의 하나를 높은 냉각재온도 온도로 인한 PWSCC로 보고 1994년에 ORT를 적용하여 고온관 온도를 621°F에서 611°F로 감소시켜 운전하였다. 현재 Palo Verde는 ORT 적용 이후 증기발생기 관막음율의 증가추세는 상당히 완화되어 그 효과가 성공적으로 나타나고 있는 것으로 평가된다. 이외에도 Point Beach, ANO-2, San Onofre 2,3호기 등 대부분의 미국 원전 특히, 냉각재온도가 600°F 이상으로 운전되었던 전 CE형 원전은 ORT 운전을 적용하고 있다.

영광 3,4호기의 냉각재 설계 온도는 621°F으로 전 세계 가압경수로(PWR) 중 가장 높은 상태이며 '99. 6월 안전성 점검시 영광 3,4호기 증기발생기 전열관 마모현상의 중점적 관리와 부식손상에 대한 예방대책이 요구된 바 있다. 이에 따라 영광 3,4호기의 운전온도 감소운전을 실시하여 증기발생기 전열관 응력부식균열의 발생을 억제하여 증기발생기 교체시기를 지연시키고 정비일수 단축 등 유지보수 비용을 감소시킬 필요성이 타당성 연구를 통해 제시되었다[1].

원자로 냉각재온도를 감소시킬 경우 증기발생기 압력은 떨어지고, 증기발생기 압력이 감소하면 100% 원자로출력을 유지하기 위해서 증기 유량은 증가해야 한다. 그러나 터빈/발전기 계통은 최대 흐를 수 있는 증기유량이 있어 일정량 이상의 증기를 수용할 수 없게 되어 터빈설계가 냉각재 온도 감소 폭을 결정하는 중요한 요소가 된다. 냉각재온도 감소운전 연구는 현 영광 3,4호기 원전 설비를 기준으로 계통연계 분석을 통해 ORT 운전조건을 결정하고, 결정된 ORT 조건에서 계통성능분석, 안전해석, 기기 건전성평가를 수행하여 인허가 취득 및 영광 3,4호기에 ORT를 직접 적용하고자 한다. 따라서, 본 연구에서는 냉각재온도 감소운전 연구의 첫 단계로 원자로, 증기발생기 및 터빈/발전기 계통연계 분석을 수행하고 ORT 조건 결정 및 그 근거를 제시하였다. 본 연구는 ORT 적용의 시급성 및 경제성을 고려하여 영광 3,4호기의 Hardware를 변경하지 않고 출력감소를 최소화하는 것을 목표로 하고 있다. 고온관 온도 감소 운전에 따른 주요 운전변수의 변화를 예측하기 위한 계통연계분석에는 영광 3,4호기 설계자료와 현장 운전자료가 사용되었고, 증기발생기 열수력 및 터빈/발전기 계통 열평형 계산코드로 SAFE 및 THB 코드가 현 발전소 운전상태를 기준으로 보정하여 사용되었다. 고온관 온도 및 관막음율 변화에 따른 민감도 분석으로 (1)저온관 온도 및 냉각재 질량유량, (2)증기발생기 2차측압력 및 증기유량, (3)고압터빈 입구에서의 주증기 압력 및 유량, 엔탈피, (4)밸브개도, 터빈유입유량, 터빈출력 등 1차측 및 2차측 주요 운전변수에 대한 분석을 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 민감도 분석결과를 바탕으로 터빈계통의 설계변경 없이 ORT 적용시점(2002년 말경)에서 100% 원자로 열출력을 유지할 수 있는 온도를 ORT 초기운전조건으로 제시하였으며, 향후 Power Uprating 적용 가능성 및 참조 발전소인 Palo Verde 원전의 ORT 적용사례 등을 고려하여 여유 있는 범위로 ORT 해석조건을 결정하였다.

II. ORT 적용을 위한 계통 분석

가. 운전 및 설계자료 분석

운전 및 설계자료로는 영광 3,4호기 6월 및 8월의 운전자료를 수집하였다. 6월 자료의 경우 각 호기별로 2000년 6월 15일 0시에서 2000년 6월 16일 23시까지의 기간동안 12시간 간격으로 각 운전자료에 대해 4 set을 취득하였다. 또한, 8월 자료의 경우 각 호기별로 2000년 8월 1일 0시에서 2000년 8월 4일 23시까지의 기간동안 12시간 간격으로 각 운전자료에 대해 8 set를 취득하였다. 민감도 분석에 사용할 운전자료는 호기별 월별 운전자료와 영광 3,4호기 운전이력, 설계값 및 시 운전자료를 검토하여 결정하였다. 그중 영광 3호기 운전자료는 현재 발전소의 주요 운전변수를 정확히 반영하지 못하므로 민감도 분석용 자료는 영광 4호기 8월 운전자료를 기준으로 생산하였다. 특히, 주요 운전변수인 고온관 온도의 경우 Hot Leg 1/2의 temperature control channel, narrow range 8 channel에 대한 8개 set(80개 자료)의 평균한 값이며, 저온관 온도의 경우 각각 Cold Leg 1A 및 2B의 temperature control channel, Cold Leg 1B/2A wide range, narrow range 8 channel에 대한 8개 set (96개 자료)의 측정치를 평균하였다. 현재의 운전변수 결정에 각 계측기로부터 측정된 측정자료의 편향성 (bias)을 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 2000년 8월 21일 현재 영광 3,4호기 각 호기별 증기발생기 관막음은 영광 3호기 및 영광 4호기 각각 0.13% 및 0.44%로 3,4호기 평균 관막음율은 약 0.3%이다.

또한 <표-1> 및 <표-2>는 영광 3,4호기의 원자로냉각재계통과 증기발생기에 대한 주요설계 및 운전변수[2]와 영광 4호기 8월 운전자료의 주요 변수를 비교한 것이다. <표-1>의 현재 운전자료에 따르면 열출력은 2828 MWt로 설계치 2825 MWt 보다 3 MW 정도 큰 값을 나타내나 이 차이가 고온관 및 저온관 온도에 미치는 영향은 미미하다. 냉각재 유량은 정상상태 100% 출력 조건에서 100% 설계유량이며 이는 증기발생기 관막음률 8%의 발전소 수명말기를 기준한 값이다. 따라서 현재 제시된 냉각재 질량 유량은 발전소 수명초기의 관막음률 상태와 계기오차 등을 고려한다하더라도 현재 냉각재 체적 유량은 108% Qd (design flow) 이상을 유지하며 운전되고 있다. 냉각재 질량 유량은 체적 유량에 현재 저온관 온도에 따른 밀도를 곱하여 계산된 값이다. 냉각재 유량은 고온관 온도 및 저온관 온도에 절대적인 영향을 미치는 인자로서, 냉각재 유량이 증가할수록 고온관 온도는 감소하고 저온관 온도는 증가한다. 따라서 현재 냉각재 운전온도는 Tcold 운전범위를

<표-1> 영광 3,4호기 냉각재계통 운전 및 설계 자료 비교

Parameters	Design Value ⁽¹⁾	Present Value ⁽²⁾
Design Thermal Power, MWt	2825	2828
Coolant Flow Rate, lb/hr	121.5 x 10 ⁶	131.33 x 10 ⁶
Cold Leg Temperature, Operating, °F	564.5	563.9
Average Temperature, Operating, °F	592.85	590.35
Hot Leg Temperature, Operating, °F	621.2	616.8
Normal Operating Pressure, psia	2250	2240

Note : (1) 100% 전출력 정상운전 조건 (8% 관막음 기준)

(2) 8월 영광 4호기 운전자료

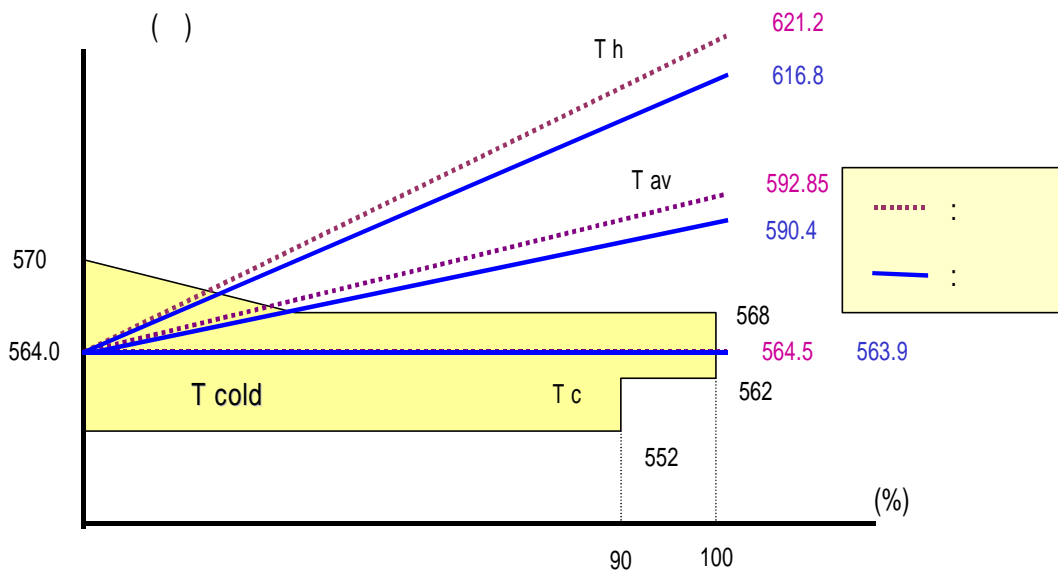
<표-2> 영광 3,4호기 증기발생기 운전 및 설계 자료 비교

Parameters	Design Value	Present Value ^{note}
Primary Side Flow Rate per SG, 10 ⁶ lb/hr	60.75	65.67
Primary Side Inlet Temperature, °F	621.2	616.8
Primary Side Outlet Temperature, °F	564.5	563.9
Primary Side Operating Pressure, psia	2250	2240
Feedwater Temperature, °F	450	454
Steam Flow, 10 ⁶ lb/hr	6.36	6.39
Steam Dome Pressure, psia	1070	1086

Note : 8월 영광 4호기 운전 자료 기준

유지하기 위해 고온관온도와 평균온도(Tref)를 낮추어 운전하고 있다. <그림-1>은 영광 3,4호기 현재의 운전온도를 나타내주고 있다. 이에 따르면 Tref는 590.4°F로 유지되고 있으며 고온관 온도는 설계치 621°F보다 4.2°F 낮은 616.8°F로 운전되고 있다. 즉, 현재 운전중인 영광 3, 4 호기 발전소의 경우는 이미 설계조건보다 낮은 고온관온도 감소운전을 시행하고 있다고 볼 수 있다.

<표-2>의 증기발생기의 경우는 주급수 온도가 설계치 450 °F에 비해 약 4 °F 높은 것을 알 수 있다. 주급수 온도가 설계치보다 높게 운전되는 원인은 알 수 없으나 영광 3, 4호기 인수성능시험 보고서[3]에서 주급수 온도가 453.6 °F - 456.6 °F임을 확인할 수 있다. 현재의 주급수 운전 온도가 설계치보다 높게 나타나는 것은 영광 3,4호기 2차 계통의 설계 및 운전특성이라고 판단되므로 현재 측정치인 주급수 온도 454 °F는 설계값 보다는 높으나 제대로 측정된 값이라 볼 수 있다. 주급수온도의 상승은 증기유량의 증가 요인이 된다.



<그림-1> 현 영광 3,4호기 운전현황

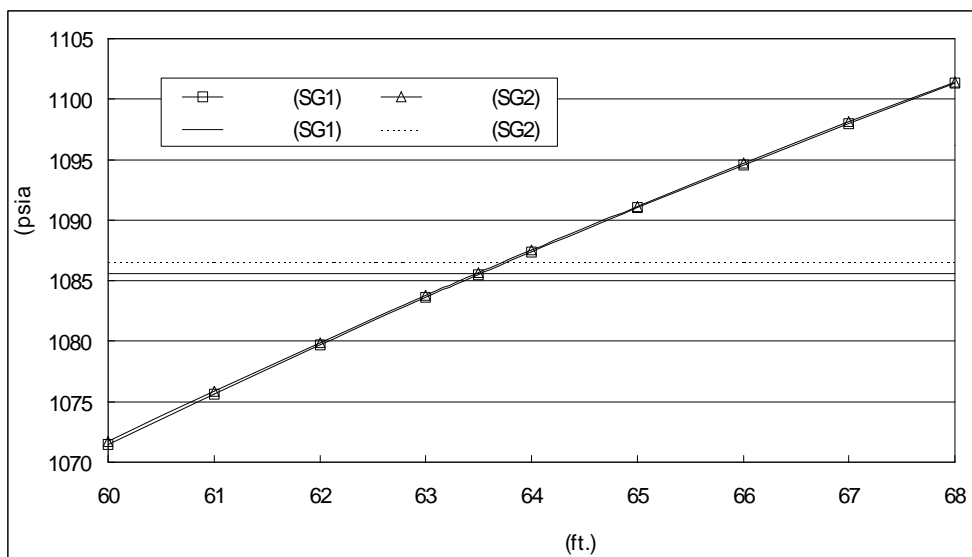
나. 분석 코드 보정

<표-3>는 SAFE 코드 보정용 입력 자료이다. 측정된 냉각재 유량으로부터 증기발생기별 열량을 이용하여 개별 일차측 유량을 결정하였다. 관막음 자료는 영광 3,4호기 증기발생기 현황을 이용하였으며 관막음된 전열관의 위치에 따라 전열관의 길이는 차이가 있으나, 그 영향은 무시하고 모두 평균 길이로 고려하였다.

<표-3> 코드 보정용 입력 자료

Parameter	SG1	SG2
Heat Load per SG (Rx Power + RCP Power), MWt	1413	1415
Primary Flow Rate, 10 ⁶ lb/hr	65.72	65.81
Primary Inlet Temperature	616.8	616.8
Primary Outlet Temperature	563.9	563.9
Economizer Feedwater Flow Rate, 10 ⁶ lb/hr	5.736	5.671
Downcomer Feedwater Flow Rate, 10 ⁶ lb/hr	0.713	0.769
Blowdown Flow Rate, 10 ⁶ lb/hr	0.053	0.053
Feedwater Temperature, °F	454.8	454.1
Steam Pressure @Steam Dome, psia	1085.55	1086.54
Number of Active Tube	8162	8194

측정된 압력과 동일한 압력이 계산되는 SAFE 코드의 전열면적과 현재 운전중인 증기발생기의 전열면적 차이를 비교하여 코드를 보정하였다. 측정된 운전 자료를 적용하여 계산된 전열면적에 따른 증기압은 <그림-2>에 나타내었다. 측정 증기압에 해당하는 전열관 개수대비 SG1과 SG2의 전열 길이는 각각 63.52 ft.(전열관 수 = 8162), 63.74 ft.(전열관 수 = 8194)이로서 현재 증기발생기의 평균 전열 길이인 63.55 ft.와 매우 근사한 결과를 보여 주고 있다. 민감도 분석에서는 전열관 길이를 63.52 ft로 적용하여 성능 분석을 수행하였다. 측정된 SG1, SG2의 일차측 압력 강하는 35.8 psid, 35.7 psid이고, 계산된 값은 각각 37.1 psid, 36.9 psid으로 계산된 값이 측정값 보다 각각 3.5%, 3.3% 크게 나타났으나, SAFE 코드의 오차 한계 (±5%) 내에 있음이 확인되었다[4,5].



<그림-2> 평균 전열관 길이에 따른 증기압

THB 코드는 발전소의 터빈사이클에 들어가는 기기들을 배열하여 각 기기들에서의 열평형을 계산하여 발전기에서 생산되는 출력과 터빈사이클의 효율을 예측하고 터빈을 설계하기 위한 기초자료를 생산하는 프로그램이다. 이 코드 보정에 사용된 현장 입력자료와 결과는 <표-4>이다. 증기발생기 출구유량, 터빈입구에서의 증기 압력과 엔탈피, 복수기 압력에 대한 운전 자료를 이용하여 계산된 출력은 1041.3 MWe이다[6]. 설계값(1049.5 MWe)보다는 8.2 MWe 작은 결과이나, Blowdown flow가 설계치와 다른 0.82%이고 Condenser 부압이 2.18HgA임을 고려할 때 설명할 수 있는 값이다. 현장에서 측정한 출력값 1028.53 MWe와 비교할 경우 1.24% 큰 결과이나 발전소 계측기 불확실성(오차)을 고려하면 THB 코드의 계산결과는 적절한 것으로 판단된다.

<표-4> 영광 3,4호기 민감도 분석 터빈출력 재검토

No.	Description	Design Data	Site Data
1	SG Inlet Flow, lb/hr	12,745,440	12,888,200
2	SG Outlet Flow, lb/hr	12,720,000	12,782,400
3	BD Flow, %	0.2	0.82
4	Throttle Pressure, psia	1,035.0	1,053.0
5	Throttle Enthalpy, Btu/lb	1,188.71	1,188.05
6	Condenser Pressure, HgA	1.5	2.18
7	Throttle Flow, lb/hr	12,140,845	12,189,136
8	Generator Output, MWe	1,049.5	1,041.3
9	Site Generator Output, MWe	-	1,028.53
10	Deviation, %	-	1.24%
11	급수온도, °F	450.0	454.0

다. 운전변수 민감도 분석

영광 3,4호기 ORT 민감도 분석은 1,2차로 구분하여 수행하였다. 1차 민감도 분석은 원자로 열출력을 100%로 고정한 경우이고, 2차 민감도 분석은 1차 민감도 분석 결과에서 터빈 조절밸브를 완전히 개방(VWO)하여도 일차측 원자로 열출력을 모두 수용할 수 없는 경우에 대한 추가적인 분석이다. 따라서 2차 민감도 분석의 원자로 열출력은 설계기준 100% 이하이고, 고온관 온도 및 관막음율에 따라 각각 다른 값이 적용되었다.

1차 민감도 분석에서 고온관 온도 및 관막음율에 대한 발전소 일·이차측 운전변수 및 터빈 출력 분석은 고온관 온도 616.8 °F (영광 4호기 8월 현재 운전조건), 612 °F, 611 °F, 610 °F, 609 °F (관막음율 0, 1, 2, 4, 6, 8%)에 대하여 수행하였으며, 614 °F와 607 °F에서는 관막음율 1%에 대하여 수행하였다. 1차 민감도 분석 결과에 따르면 고온관 온도 612 °F에서 관막음율 2%와 4% 사이가 원자로 열출력 100%를 유지하는 터빈 발전기의 수용 한계임을 알 수 있다. 따라서 2차 민감도 분석결과에서 고온관 온도 및 관막음율에 대한 발전소 일·이차측 운전변수 및 터빈 출력 분석은 612 °F (관막음율 4, 6, 8%), 611 °F 및 610 °F (관막음율 0, 1, 2, 4, 6, 8%), 609 °F와 607 °F (관막음율 1%)에 대하여 수행하였다. 2차 민감도 분석의 원자로 열출력은 터빈유입유량과 보정 급수온도를 기준하여 다시 계산한 값을 적용하였다.

(1) 고온관 및 저온관 온도

<표-5>는 고온관 온도 612 °F에서 관막음률 2%까지는 원자로출력을 100%로 운전할 때의 1차 계통(원자로 및 증기발생기) 주요 운전변수이며 그 이후는 터빈 제어밸브를 100% 개방한(VWO) 상태에서의 원자로 열출력과 1차계통 주요 운전변수를 나타내고 있다[7,8]. 밸브 개도 100% 이상은 증기유량이 터빈조절밸브의 용량을 초과하게 되므로 발전소 운전을 위해서는 일차측 열출력을 감소시킬 수밖에 없다. 여기서 일차측 열출력은 터빈 민감도 분석 결과표의 열출력을 근거로 터빈 유입유량과 증기와 주급수의 엔탈피 차로 계산하였다. 급수온도는 터빈 민감도 분석 결과의 450.5 °F ($T_{hot} = 616.8$ °F, 0% 관막음)와 측정된 주급수온도(454 °F)의 차이(3.5 °F)를 1차 터빈 발전기 민감도 분석결과에 각 급수온도에 더하여 계산하였다(표-8). <표-5>를 보면 고온관 온도 611 °F의 경우 관막음률 0%에서 저온관 온도는 557.6 °F이고 8%에서는 558.0 °F로 저온관 온도가 0.4 °F 높아짐을 알 수 있다. 이것은 일차측 열출력 감소 영향으로 2차 민감도 분석에서는 일차측 열출력을 터빈발전기 수용 용량에 맞추어 재계산하였으므로 1차 민감도 분석보다 2차 민감도 분석 경우의 저온관 온도가 높다[9].

(2) 원자로 냉각재 유량

고온관 온도 감소에 따른 체적유량(volumetric flow)의 변화는 0.1% 정도로 무시할만하다. 민감도 분석 초기 냉각재 유량인 108% Q_D 는 현재 운전중인 영광 4호기 운전자료와 시운전 경험 자료를 평가하여 결정하였다. 증기발생기 8% 관막음으로 인한 약 1.5%의 유량 감소를 고려하면 8% 관막음일 때 체적유량은 106.5%가 된다. 냉각재 유량 민감도 분석에는 유량 측정 불확실도의 영향은 고려하지 않았다. 질량유량은 체적유량에 각 관막음 조건에서의 저온관 온도를 기준으로 한 밀도를 곱하여 계산하였다.

(3) 증기발생기 관막음율

증기발생기 관막음률의 증가는 일차측 냉각재 유량의 감소를 초래하므로 일차측 열출력과 고온관 온도를 일정하게 유지시키기 위해서는 저온관 온도를 감소시켜야 한다. 저온관 온도의 감소는 증기발생기 2차측 압력을 감소시키게 되고 증기발생기 2차측 압력감소에 따른 증기 질량유량도 감소하지만 증기 체적유량은 증가하게 된다. 증기유량의 증가가 터빈 조절밸브의 용량 범위를 초과하게 되면 터빈출력을 감소시킬 수밖에 없으며 결국 일차측 열출력의 감소운전을 초래하게 된다.

(4) 증기발생기 증기압 및 증기유량

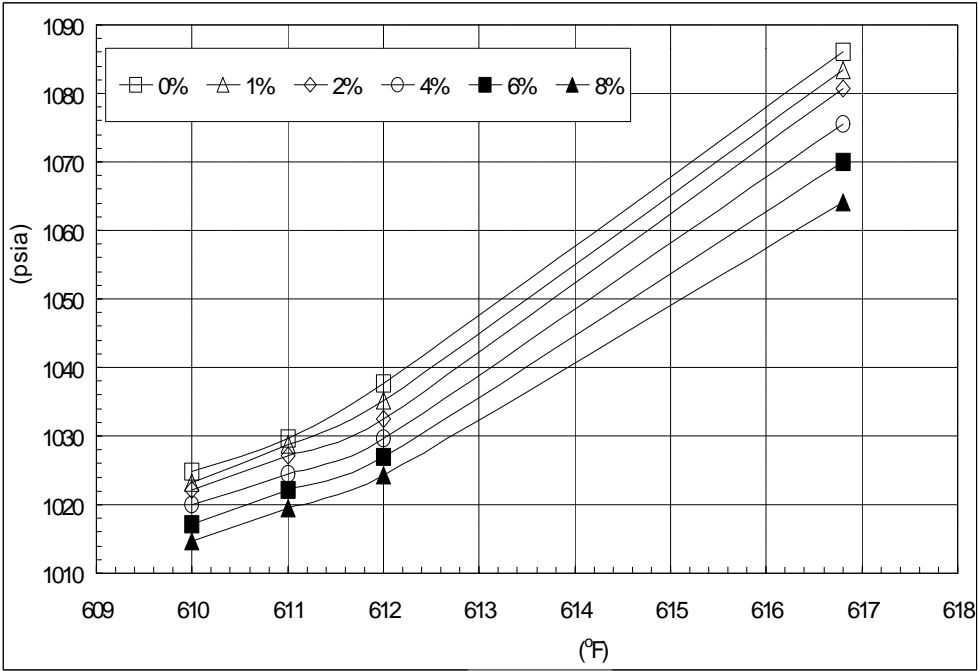
증기발생기 압력은 냉각재 고온관 및 저온관 온도, 관막음율, 냉각재 유량으로부터 SAFE 코드를 이용해 계산하였고 증기유량은 급수의 엔탈피 및 증기의 엔탈피, 증기발생기 열부하를 이용하여 열평형식으로 계산하였다. 여기서 주급수 온도는 454.0°F를 사용하였다. <표-5>의 증기발생기 압력과 유량은 냉각재 고온관 온도 612 °F의 관막음률 2%까지는 원자로출력을 100%로 운전하는 경우이며 그 이후는 터빈 제어밸브를 100% 개방한(VWO) 상태에서의 값이다[9]. <그림-3>은 고온관 온도에 따른 증기압이고, <그림-4>는 관막음률에 따른 증기압이며 1,2차 민감도 분석결과를 함께 나타내었다. 추가로 수행된 증기발생기의 압력을 비교해 보면 2차 민감도분석 결과가 1차 민감도분석 결과에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 고온관 온도 612 °F의 4% 관막음률인 경우 1차 민감도분석 결과에서는 1027.6 psia, 2차 민감도 분석에서는 1029.6 psia의 결과로 나타났으며 8% 관막음률의 경우는 각각 1016.6 psia와 1024.2 psia의 결과를 나타내고 있어 고온관 온도가 감소하고 관막음률이 증가함에 따라 증기발생기 증기 압력의 증가폭이 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 증

기발생기 증기 압력이 증가하는 이유는 2차 민감도 분석에서의 원자로 열출력이 감소하고, 원자로 열출력 감소에 따라 동일한 고온관 온도에서의 저온관 온도가 증가하기 때문이다.

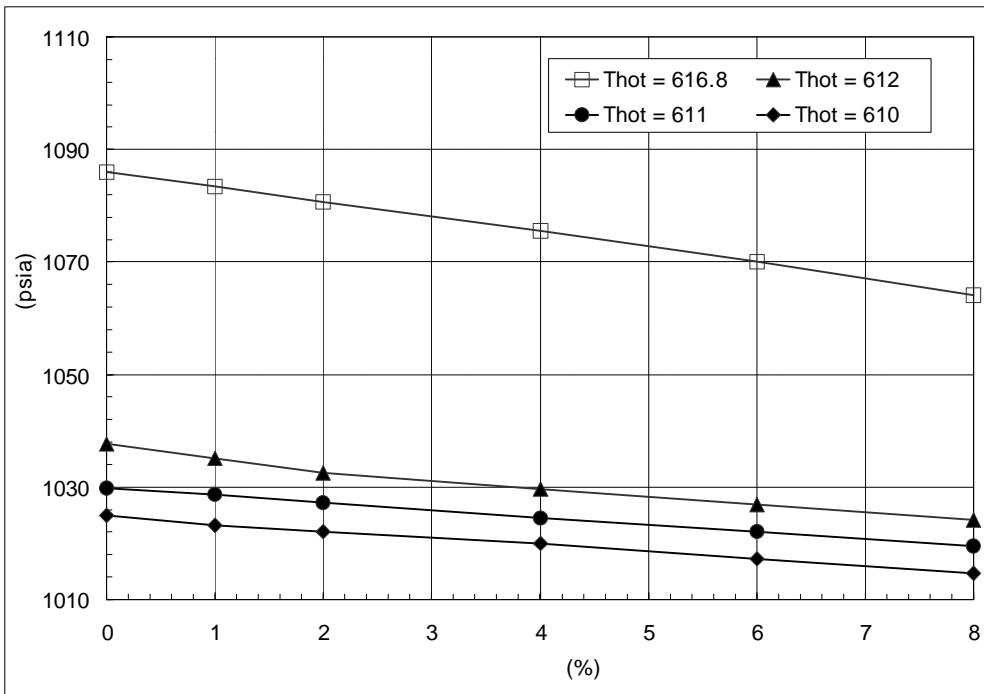
증기 유량의 경우 1차 민감도 분석 결과에서는 고온관 온도 감소와 관막음을 증가에 따라 약간 감소하는 경향을 보이고 있으나, 2차 민감도 분석에서는 조금 더 큰 폭으로 감소한다. 이것은 2차 민감도 분석에서의 일차측 열출력 감소로 인한 증기발생기 당 열부하 (heat load)의 감소가 증기 질량유량의 감소 요인으로 작용되었기 때문이다.

<표-5> 냉각재 계통 주요 운전 변수

고온관 온도	S/G 관막음을	원자로 열출력	냉각재 유량		저온관 온도	S/G 증기압	S/G 당 증기유량
			체적유량	질량유량			
°F	%	MWt	%Qd	Mlbm/hr	°F	psia	10 ⁶ lb/hr
616.8 (현재)	0	2825	108.0	131.33	563.9	1086.0	6.41
	1	2825	107.8	131.10	563.8	1083.4	6.41
	2	2825	107.6	130.88	563.7	1080.7	6.41
	4	2825	107.3	130.54	563.6	1075.6	6.40
	6	2825	106.9	130.09	563.4	1070.0	6.40
	8	2825	106.5	129.64	563.2	1064.2	6.40
614	1	2825	107.8	131.71	560.7	1055.0	6.40
612	0	2825	108.0	132.36	558.6	1037.6	6.39
	1	2825	107.8	132.13	558.5	1035.1	6.39
	2	2825	107.6	131.90	558.4	1032.5	6.39
	4	2817	107.3	131.5	558.4	1029.6	6.36
	6	2803	106.9	131.0	558.5	1026.9	6.33
	8	2788	106.5	130.5	558.5	1024.2	6.30
611	0	2817	108.0	132.5	557.6	1029.7	6.36
	1	2810	107.8	132.3	557.7	1028.7	6.35
	2	2804	107.6	132.0	557.7	1027.2	6.33
	4	2792	107.3	131.6	557.8	1024.5	6.31
	6	2777	106.9	131.1	557.9	1022.1	6.27
	8	2762	106.5	130.6	558.0	1019.5	6.24
610	0	2792	108.0	132.7	557.0	1024.9	6.31
	1	2787	107.8	132.4	557.0	1023.2	6.29
	2	2779	107.6	132.1	557.1	1022.1	6.28
	4	2766	107.3	131.8	557.2	1020.0	6.25
	6	2753	106.9	131.3	557.2	1017.2	6.22
	8	2838	106.5	130.8	557.3	1014.7	6.18
609	1	2760	107.8	132.5	556.4	1018.6	6.23
607	1	2711	107.8	132.8	555.2	1006.9	6.12



<그림-3> 고온관 온도에 따른 증기발생기 증기압 (2차 민감도 분석)



<그림-4> 관막음률에 따른 증기발생기 증기압 (2차 민감도 분석)

(5) 터빈발전기 출력

<표-6>은 냉각재온도 및 관막음울에 따른 터빈 입구에서의 증기 압력 및 엔탈피, 터빈 유입 유량, 터빈 조절밸브 개도, 터빈발전기의 전기 출력을 보여주고 있다. 터빈발전기의 전기 출력 계산의 주요한 입력 조건인 터빈 입구에서의 증기 압력은 영광 3,4호기 설계자료를 근거한 압력강하와 밀도 변화에 따른 증기유량 증가를 고려하여 계산하였고 증기유량은 steam reheater, steam jet air ejector, control valve seal 및 leakage 등으로 추출되기 전의 증기발생기 출구유량이다. 터빈 입구에서의 엔탈피는 전체 엔탈피가 일정하다고 가정하여 계산하였다[10.11]. 이는 기존 설계에서도 동일한 가정이 사용된다.

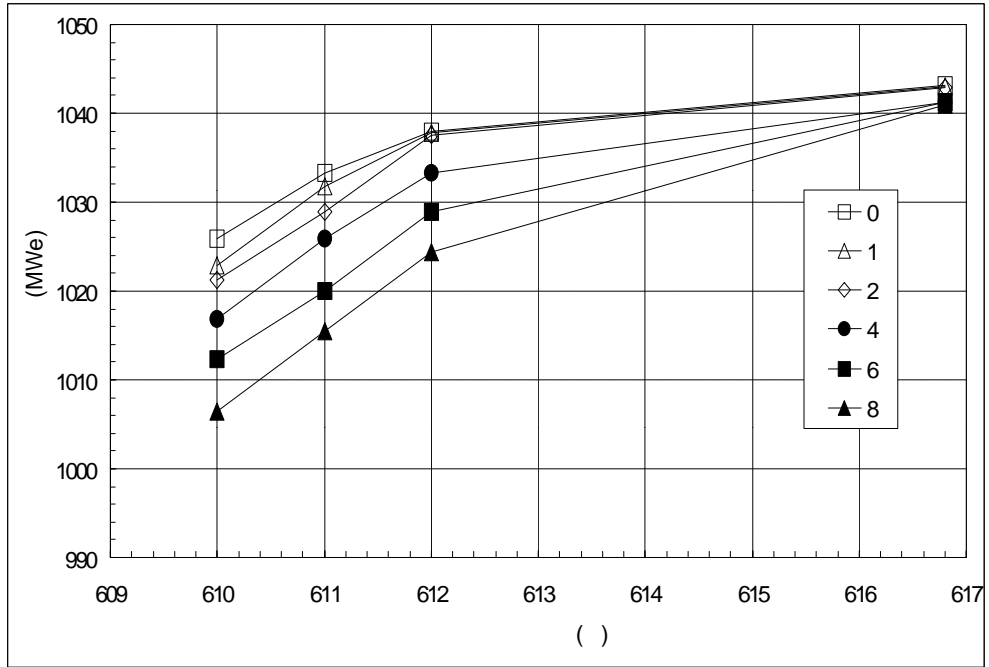
터빈의 전기 출력은 THB 코드로 계산되었으며 터빈 내부를 통과하는 질량 유량과 터빈 내부에서 증기가 팽창하므로 변환되는 엔탈피 강하량을 곱해서 산출된다. 터빈을 통과하는 유량은 증기의 조건과 터빈의 크기, 터빈 조절밸브의 개도에 따라 달라지고 엔탈피 강하량은 터빈 기기의 효율에 따라 달라진다. 고온관 온도 감소 및 관막음울 증가에 따라 터빈 입구에서의 증기 압력은 감소하고, 밀도 감소로 인한 체적 유량은 증가하게 된다. 터빈이 수용할 수 있는 체적 유량은 제한되어 있고, 터빈 조절 밸브를 완전 개방(VWO)할 때 최대 값을 갖는다.

밸브 개도는 현재 터빈으로 들어온 증기를 설계조건에서 터빈의 제어 밸브들을 완전히 열었을 때에 흘러갈 수 있는 유량으로 나누어서 구했다. 다시 말해서 증기조건이 설계조건과 달라졌을 때 설계조건으로 환산하여 유량비를 구하는 것이다. 환산에 사용되는 유량 함수(Flow Function)는 압력과 비체적의 함수이다. <표 6>의 밸브 개도를 살펴보면 612°F의 2% 관막음 이하 및 612°F 이상에서의 고온관 온도 감소 및 관막음울 증가에 따라 밸브 개도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 터빈 입구에서의 체적 유량 증가를 터빈 발전기가 모두 수용하기 위해 터빈 조절밸브가 열리는 것이다. 따라서 이 조건에서는 터빈 입구에서의 증기 유량과 터빈 유입 유량이 동일하다. 그러나 밸브 개도가 100%로 되어 있는 612°F의 4% 관막음 이상 및 611°F 이하에서는 터빈 유입 유량이 터빈 입구에서의 유량보다 작다. 이것은 밸브 개도를 완전 개방하여도 터빈발전기가 터빈 입구의 증기 유량을 모두 수용하지 못한다는 것을 의미한다. 즉, 이 조건에서는 원자로 열출력 100%로 운전이 불가능하다. 따라서 터빈발전기가 수용할 수 있는 유량에 해당하는 새로운 원자로 열출력을 계산하고 그에 따라 증기발생기 압력 및 유량을 계산하여 다시 터빈 제어밸브 개도와 전기출력을 계산하였다[12]. 이 경우 원자로 열출력이 작아 열전달 특성이 좋아져 증기발생기 압력이 조금 증가하게 되며 이에 따라 증기유량도 감소하게 되어 밸브 개도에 여유가 생기게 된다. 정확한 100% 밸브 열림에 대한 전기출력을 계산하기 위해서는 몇 번의 반복계산을 수행하여야 하나 여기서는 두 값의 평균값을 택하였다.

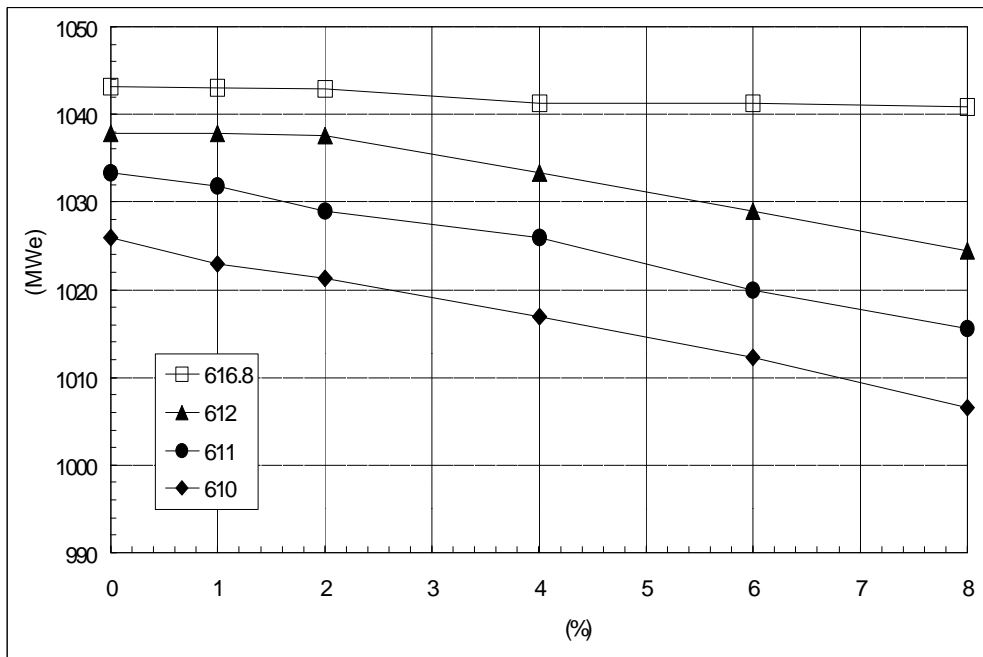
<그림-5>와 <그림-6>은 고온관 온도 및 관막음울에 따른 터빈발전기 출력이다[13]. 고온관 온도 감소에 따른 전기 출력 감소는 관막음울에 따라 다르다. 밸브개도 100%미만 즉, 터빈유입유량이 터빈 조절밸브 용량 이하에서의 고온관 온도 감소 및 관막음울 증가에 따른 터빈출력 감소는 완만하다. 0% 관막음울을 기준으로 비교할 때, 616.8°F에서 612°F로 고온관 온도를 감소시키면 전기 출력은 약 5.3MWe 감소한다. 밸브 개도 100%이상 즉, 터빈유입유량이 터빈 조절밸브 용량 이상에서는 고온관 온도 및 관막음울 증가에 따라 전기 출력이 급격히 감소한다. 이것은 원자로 열출력을 터빈 발전기가 100% 모두 수용하지 못하기 때문이다. 즉, 고온관 온도 감소 및 관막음울 증가로 인한 전기출력 감소에 원자로 열출력 감소로 인한 출력 감소 요인이 추가되어 큰 폭으로 감소하는 것이다.

<표-6> 터빈발전기 전기 출력 분석

고온관 온도 (°F)	관막 음율 (%)	원자로 열출력 (MWt)	HP 입구 증기			터빈 출력 (MWe)	밸브 개도 (%)	터빈유입 유량 (x10 ⁶ lb/hr)	급수 온도 (°F)
			압력 (psia)	엔탈피 (Btu/lb)	증기유량 (x10 ⁶ lb/hr)				
616.8	0	2825	1,052.4	1,188.0	12.82	1,043.2	94.2	12.82	450.5
	1	2825	1,049.6	1,188.1	12.82	1,043.0	94.5	12.82	450.6
	2	2825	1,046.8	1,188.2	12.82	1,042.9	94.8	12.82	450.6
	4	2825	1,041.6	1,188.4	12.80	1,041.3	95.2	12.80	450.6
	6	2825	1,035.9	1,188.7	12.80	1,041.2	95.8	12.80	450.6
	8	2825	1,029.9	1,188.9	12.80	1,040.9	96.4	12.80	450.6
614	1	2825	1020.3	1,189.2	12.80	1,040.3	97.4	12.80	450.7
612	0	2825	1,002.4	1,189.8	12.78	1,037.9	99.3	12.78	450.8
	1	2825	999.8	1,189.9	12.78	1,037.8	99.5	12.78	450.8
	2	2825	997.1	1,190.0	12.78	1,037.6	99.9	12.78	450.8
	4	2817	994.3	1,190.2	12.72	1,034.8	100.0	12.72	450.4
	6	2803	991.9	1,190.3	12.66	1,031.5	100.0	12.66	449.9
	8	2788	989.4	1,190.4	12.60	1,028.0	100.0	12.60	449.5
611	0	2817	994.4	1,190.2	12.72	1,034.8	100.0	12.72	450.4
	1	2810	993.5	1,190.2	12.70	1,033.9	100.0	12.70	450.2
	2	2804	992.2	1,190.3	12.66	1,032.0	100.0	12.66	449.9
	4	2792	989.6	1,190.4	12.62	1,029.0	100.0	12.62	449.6
	6	2777	987.6	1,190.5	12.54	1,025.1	100.0	12.54	449.0
	8	2762	985.2	1,190.6	12.48	1,022.1	100.0	12.48	448.6
610	0	2792	990.0	1,190.4	12.62	1,029.0	100.0	12.62	449.6
	1	2787	988.5	1,190.4	12.58	1,027.0	100.0	12.58	449.3
	2	2779	987.5	1,190.4	12.56	1,025.9	100.0	12.56	449.2
	4	2766	985.6	1,190.5	12.50	1,022.5	100.0	12.50	448.7
	6	2753	983.0	1,190.6	12.44	1,019.4	100.0	12.44	448.3
	8	2838	980.9	1,190.7	12.36	1,015.6	100.0	12.36	447.7
609	1	2760	984.4	1,190.6	12.46	1,020.6	100.0	12.46	448.4
607	1	2711	973.5	1,191.0	12.24	1006.8	100.0	12.24	446.8



<그림-5> 고온관 온도에 따른 터빈 출력 (2차 민감도 분석)



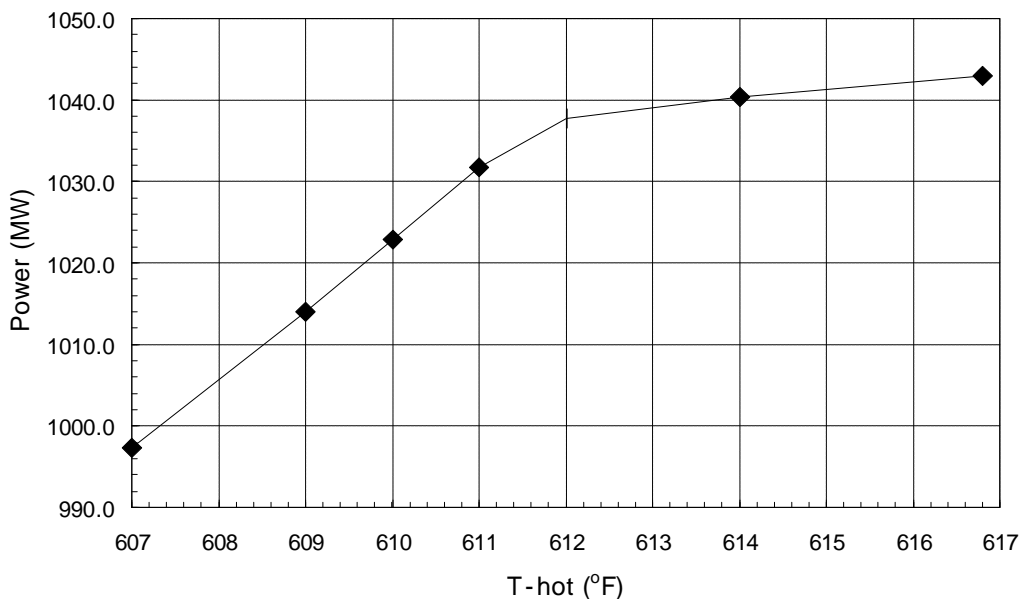
<그림-6> 관측음울에 따른 터빈 출력 (2차 민감도 분석)

III. ORT운전 조건 결정

가. 계통분석 결과 검토

냉각재 온도 감소폭과 증기발생기 튜브 관막음을 변화에 따른 민감도 분석 결과에 의하면 냉각재온도가 612°F이고 튜브 관막음을 2%까지는 원자로 출력감발없이 원자로 출력을 100%로 운전이 가능하다. 다시 말하면 냉각재온도를 612°F로 유지하고 터빈조절밸브를 계속 열어 운전하게 되면 튜브 관막음을 2%에서 4% 사이에 어느 지점에서 원자로 출력을 100% 이하로 감발하여야 한다. 만약 그 이하로 냉각재온도를 감소시킬 경우 터빈조절밸브 등 터빈계통이 증기유량을 감당하지 못하게 되어 원자로 출력을 감발해야 한다.

본 계통분석 결과에 의하면 증기발생기 관막음을 1%를 기준으로 할 경우 현 운전조건 616.8°F에서 612°F로 냉각재온도를 약 5°F 감소시킬 경우 전기출력은 5.3MWe 감소하게 된다. 이는 원자로 출력은 100%로 변함이 없으나 1차 민감도분석과 같이 증기압력이 1083.4psia에서 1035.1 psia로 감소하게 되어 터빈계통의 열효율(thermal efficiency)이 저하되기 때문이다. 그 이후로 냉각재온도가 떨어지면 급격히 전기출력이 감소하게 되는데 이는 터빈계통의 유량제한으로 원자로 출력을 100%이하로 감소시켜야 하고 612°F 이상에서와 마찬가지로 터빈계통의 열효율이 저하되는 효과가 동시에 나타나기 때문이다. <그림-7>에 의하면 611°F 이하에서 냉각재온도를 1°F 감소시킬 경우 약 9MWe의 전기출력 저하를 가져오게 된다.



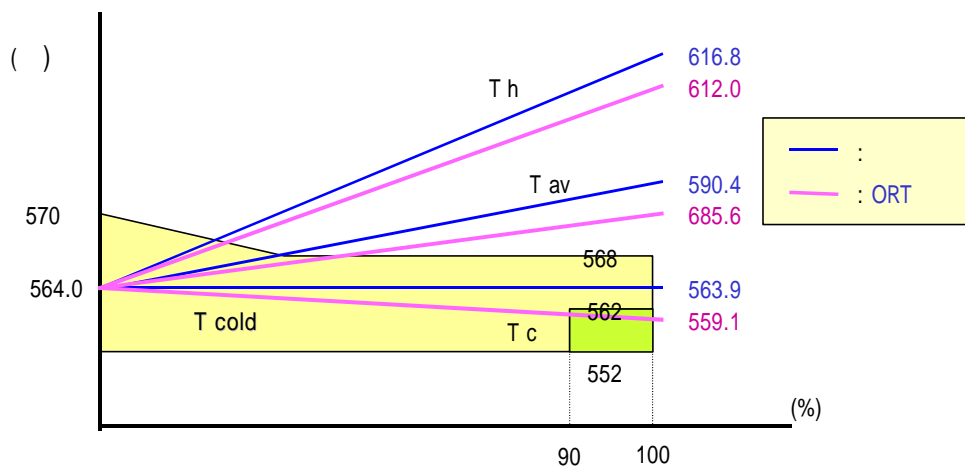
<그림-7> 냉각재온도 대비 전기출력 (관막음을 1% 기준)

나. ORT 운전조건 결정

냉각재온도를 감소시키면 전기출력이 떨어지게 되는데 이는 증기발생기 관막음을, 터빈계통의 증기유량 제한, 급수온도 등에 연관되어 있다. 만약 터빈계통의 설계 변경을 통해 허용 증기유량을 증가시킬 경우 급격한 전기출력 감소없이 운전할 수 있는 온도는 현재 계통분석 결과의 612°F 보다 낮아지게 된다. 그러나 본 과제에서는 ORT 운전조건을 계통의 Hardware 설계변경 없이 결정하기로 하였다. 따라서 ORT 적용 초기 운전조건을 상세한 경제성 평가를 수행하지 않더라도 원

자로 출력을 100%로 유지할 수 있는 상태로 결정함이 타당할 것으로 판단되어 영광 3,4호기에 ORT를 적용할 초기 운전조건은 612°F로 결정하였다. 이는 영광 3,4호기에 적용할 경우 특별한 Hardware 설비변경 없이 증기발생기 관막음이 2%~4% 사이까지는 원자로 출력을 100%를 유지할 수 있는 운전조건이다. 결국 경제적인 운전을 위해서는 증기발생기 관막음을 출력을 100%로 유지할 수 없는 지점까지 증가하기 이전에 터빈계통의 설계변경 등 다른 조치를 강구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

발전소 운전 상태는 계통의 설계변경, 증기발생기 관막음을 변화, 원자로 출력 변화 등 여러 가지 요인에 의해 변하게 된다. 특히, 향후 적용이 예상되는 원자로 출력증가(Power Uprating) 등에 따라 최적 운전조건은 변할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 향후 Power Uprating, 터빈계통 설계 등 향후 계통상태 변화 가능성에 대비하여 좀 더 여유 있는 범위로 ORT 해석조건을 결정하였다. 즉 향후 발전소 계통의 변화에 따라 ORT 해석조건(이후, ORT 조건이라 함) 범위내에서 최적 ORT 운전조건을 선택하여 적용할 수 있도록 하였다. <그림-8>은 기존의 Tcold 운전범위와 향후 ORT 반영 이후의 Tcold 운전범위를 나타내고 있고 현재의 냉각재 운전범위 및 ORT 초기 운전조건을 나타내고 있다.



<그림-8> ORT 해석 조건

IV. 결론

영광 3,4호기 ORT 운전조건 결정을 위한 계통분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 터빈/발전기 계통의 유량 설계제한으로 설비의 Hardware 변경 없는 경제적인 ORT 초기운전 조건은 고온관 온도 612°F가 적절함을 원자로, 증기발생기 및 터빈/발전기 계통 연계분석을 통해 제시하였다. 또한, 영광 3,4호기 ORT 최적조건은 관막음을 증가 등 향후 발전소 계통 운전조건의 변화, 터빈 설계변경 및 Power Uprating 적용 등에 따라 변하게 된다. 따라서 ORT 해석조건은 참조 발전소인 미국 Palo Verde 원전의 적용사례를 참고하여 고온관 온도를 611°F로 낮추어 이와 관련된 해석을 수행하여 좀 더 여유있는 운전범위를 유지하려 하였다.

ORT 적용에 따른 터빈 전기출력의 감소는 2000년 8월 운전조건 대비 약 5.3MWe 감소될 것으로 예상되며 향후 Power Uprating을 적용할 경우 증가되는 유량을 수용하기 위해서는 터빈설계 변경이 병행되어야 할 것으로 고려되어 진다.

참고문헌

- [1] 1차측 냉각재 온도 감소 운전 - 타당성 조사, TR.99NJ04.S2000.220, 5/25/99, 한전 전력연구원.
- [2] YGN 3&4 FSAR, 한국전력공사.
- [3] 영광원자력발전소 3&4 호기 인수성능시험 보고서, 한국전력공사.
- [4] P.M. MEMO, 계통분석 관련 코드 보정용 운전자료 및 민감도 분석용 초기 입력자료 송부, EH(D)-002, 09/22/2000, 한국전력기술(주).
- [5] SAFE 코드 보정, HR(D)-S001, 09/09/2000, 한국중공업(주).
- [6] 민감도 분석 터빈출력 재검토, HCS(D)-T006, 10/26/2000, 한국중공업(주).
- [7] P.M. MEMO, 한중 SG 민감도 2차 분석용 입력자료 송부, ECS(D)-008, 10/31/2000, 한국전력기술(주).
- [8] 1차 민감도 분석 (SG), Rev.1, HR(D)-S005, 11/10/2000, 한국중공업(주).
- [9] 2차 민감도 분석 (SG), Rev.1, HR(D)-S006, 11/10/2000, 한국중공업(주).
- [10] P.M. MEMO, 계통분석분야 T/G 입력자료 송부, EH(D)-003, 9/22/2000, 한국전력기술(주).
- [11] 1차 민감도 분석 (TG) 수정분, HCS(D)-T005, 10/24/2000, 한국중공업(주).
- [12] P.M. MEMO, 한중 TG 2차 민감도분석용 입력자료 송부, ECS(D)-010, 11/14/2000, 한국전력기술(주).
- [13] 민감도 분석 (TG) 최종본, HCS(D)-T007, 11/22/2000, 한국중공업(주).